

地形断面における斜面崩壊地の滑落崖と移動体の数学表現

植田 允教・根本 達也・ベンカテッシュ ラガワン

Mathematical Expression of Scarp and Main Body of Slope Failure Area in Geometric Section

Mitsunori UEDA, Tatsuya NEMOTO and Venkatesh RAGHAVAN

大阪公立大学大学院理学研究科地球学専攻 Department of Geosciences, Graduate School of Science,
Osaka Metropolitan University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-5858, Japan.
E-mail: so22000t@st.omu.ac.jp

キーワード：斜面崩壊地判読，地形変化，地形断面，法線ベクトル，外積

Key words：Slope Failure Identification, Topographic Changes, Geometric Section, Normal Vector, Cross Products

1. はじめに

斜面崩壊は、斜面上の土砂や岩石が滑り落ちる現象であり、都市計画・環境保全・防災の観点から非常に重要な現象である。そのため、統計的手法や機械学習手法を活用した斜面崩壊地の自動識別に関する研究が進められている (Wang *et al.*, 2021)。しかし、これらの研究は、地形・地質などの多数のデータから各種解析手法を用いて行われており、使用データの精度や解像度に大きく依存する。そのため、対象となる時期や地域の違いにより使用されるデータやモデルの構築に重要となる情報が異なる。より普遍的な識別モデルを実現するためには、斜面崩壊地とその構造 (滑落崖や移動体など) を数学的に表現する必要がある。

植田ほか (2024) は、ランダムフォレストを用いて、斜面崩壊地の抽出を行い、斜面崩壊地のもつ滑落崖と移動体の識別には地形的条件よりも幾何的情報が重要であることを示した。本研究では、法線ベクトルの外積を導入することで、斜面崩壊地の構造である滑落崖と移動体を数学的に表現する方法を提案する。

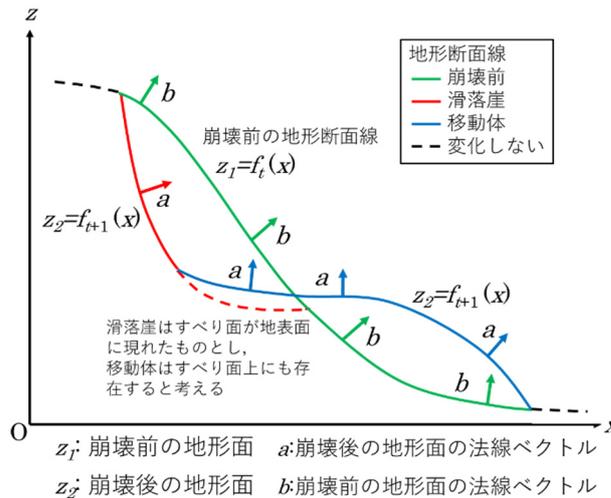
2. 滑落崖と移動体の表現方法

2.1 斜面崩壊による地形面の変化

斜面崩壊地の構造である滑落崖と移動体を地形断面の変化から表現する。

ある点 O を原点とし、水平方向に x 軸、鉛直上向きに z 軸をもつ 2 次元空間が設定されているものとする (第 1 図)。また、 x 軸は原点 O から斜面の流下方向にとられる。ある時間における地形断面線を一価関数の曲線 $z=f_t(x)$ とすると、地形断面線は時間発展により、 $z_1=f_t(x)$ 、 $z_2=f_{t+1}(x)$ 、... と変化していく。斜面崩壊により地形断面線が $z_1=f_t(x)$ から $z_2=f_{t+1}(x)$ に変化したとすると、斜面崩壊を侵食堆積現象として考え、差分により式 (1) の判別式で分類できる。

$$event = \begin{cases} erosion & z_2 - z_1 < 0 \\ non\ change & z_2 - z_1 = 0 \\ deposition & z_2 - z_1 > 0 \end{cases} \quad (1)$$



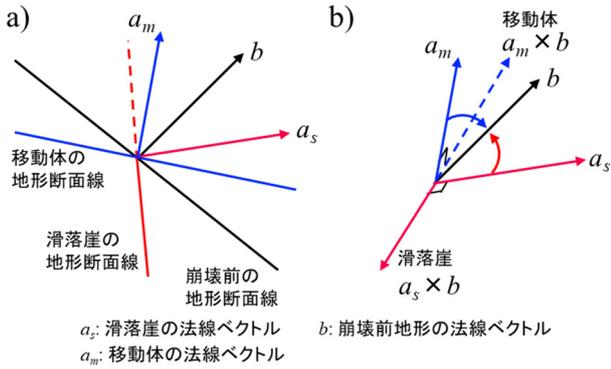
第 1 図 崩壊前後の地形面の変化の関係

滑落崖は侵食領域の一部であり、すべり面が地表面に現れたものとする地下にすべり面が形成され、すべり面の上位にも移動体が存在する。そのため、移動体は侵食領域と堆積領域の両方に含まれる。崩壊後と崩壊前の地形断面線に対して垂直で地上方向を向く単位ベクトル a 、 b で表すと、斜面崩壊地の滑落崖と移動体を分類するためには、侵食領域に存在する 2 つの要素を地形形状の違いから分類することになる。また、堆積領域については斜面形状に関わらず移動体となることがわかる。

2.2 地形面の法線ベクトルの変化

崩壊前と崩壊後における地形断面線の関係は、崩壊前後の地形断面線の変化として説明することができる (第 2 図)。崩壊後と崩壊前の地形面に対する法線ベクトル a 、 b で表すと、崩壊後と崩壊前の地形面の変化は、2 つの法線ベクトルの外積 $a \times b$ により表現できる (式 (2))。

$$a \times b = (a_x b_z - a_z b_x) \quad (2)$$



第2図 地形断面線における法線ベクトルとその外積 (a) 地形断面線における変化, (b) 各ベクトルと外積の関係

滑落崖の法線ベクトルを a_s , 移動体の法線ベクトルを a_m とすると, 地形断面線は一箇関数かつその法線ベクトルは地上方向に向いているため, 外積の方向より斜面崩壊地の滑落崖と移動体を分類することができる(第2図). よって, 式(2)の解の正負により滑落崖と移動体の分類が可能である. ただし, 外積のみで表現した場合, 地形断面線の角度が変化せず, そのまま落ちるようなタイプの斜面崩壊は, 同方向のベクトルから外積を求めることになるため, 表現できない.

3. 地形断面線における滑落崖と移動体の分類

3.1 分類基準

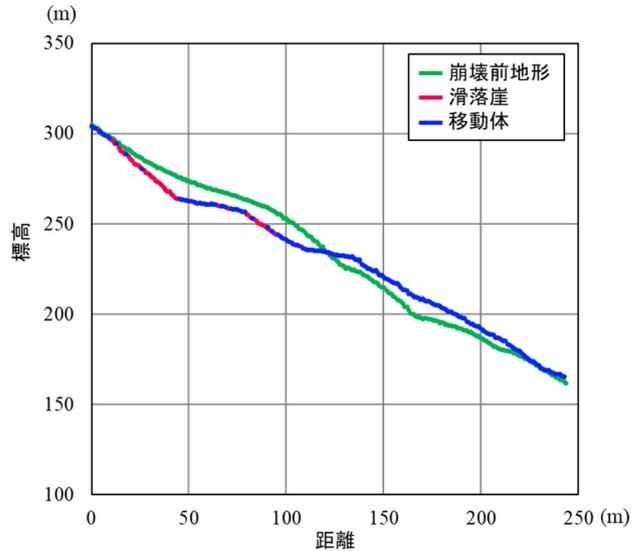
斜面崩壊地の地形変化である式(1)と相対的な地形面の法線ベクトルの外積である式(2)から, 滑落崖と移動体を分類するための基準を構築した. 分類基準は, xy 軸の2次元空間で設定され, x 軸は式(1)である地形の差分, y 軸は式(2)により求められた地形断面線の法線ベクトルの外積とする. ここで, 外積の向きは第2図の $a_m \times b$ 方向を正とした関係を第3図に示す. これにより斜面崩壊地の滑落崖と移動体を分類できることがわかる. 差分では, 崩壊前より崩壊後の標高が高ければ, 形状に関わらず堆積域であるため移動体となり, 低ければ滑落崖もしくは移動体とされる. 崩壊後における地形断面線の法線ベクトル a から崩壊前の地形断面線に対する法線ベクトル b の外積をとると, 標高が低くなった領域において0を基準とし負の値であれば滑落崖, 正の値であれば移動体となることがわかる.

3.2 斜面崩壊地の自動抽出

兵庫県丹波市の北部地域で発生した斜面崩壊地を対象に地形断面線の滑落崖と移動体の自動分類を行った(第4図). 地形データは斜面崩壊の前後に取得された航空レーザ測量データから1m DEMを作成し使用した. 作成した1m

地形断面線の法線ベクトルの外積		地形面の差分
崩壊地内の移動体 $z_2 - z_1 < 0$ かつ $a \times b > 0$	堆積域の移動体 $z_2 - z_1 > 0$ かつ $a \times b > 0$	
滑落崖 $z_2 - z_1 < 0$ かつ $a \times b < 0$	堆積域の移動体 $z_2 - z_1 > 0$ かつ $a \times b < 0$	

第3図 斜面崩壊地分類のための特徴空間



第4図 地形断面線における滑落崖と移動体の自動分類

DEMを用いて地形断面線を作成し, 差分と法線ベクトルの外積を求め, 自動的に滑落崖と移動体を分類した. 斜面崩壊地の滑落崖と移動体が数値的に表現されたことで, 概ね斜面崩壊地の地形断面線が滑落崖と移動体に分類されていることがわかる.

4. おわりに

本研究では, 崩壊前後の地形断面線から法線ベクトルの外積を用いることで, 斜面崩壊地の滑落崖と移動体が数学的に表現できることを示した. これにより, 滑落崖と移動体を数値的に取り扱うことができるようになり, 2つの特徴を地形断面線から自動的に分類できるようになった.

しかし, 次の問題が残る.

- ① 3次元への拡張
本研究では, 地形断面線という2次元での滑落崖と移動体の分類について議論したが, より一般的に考えるためには3次元への拡張する必要がある. そのためには, 斜面方位の問題を解決しなければならない. 本研究で示した原理は, x 軸を流下方向に固定することで, 外積における座標軸を決定している. しかし, 3次元に拡張した場合, 相対的な面同士の関係を表現する必要がある.
- ② 地形の差分と外積の関係
滑落崖と移動体の自動分類において, 地形の差分と法線ベクトルの外積を用いて分類基準を設定したが, 2つの要素の関係は厳密ではない. そのため, 地形面の差分と地形面の法線ベクトルの外積の関係を数学的にまとめる必要がある.

①と②の問題を解決することで, 3次元における斜面崩壊地の滑落崖と移動体を数値的に取り扱うことができるようになる.

文 献

植田允教・根本達也・ベンカテッシュラガワン(2024) ランダムフォレストと Change Vector Analysis を用いた斜面崩壊地における地形変化の抽出. 第35回日本情報地質学会講演会 講演要旨集, pp.29-30.

Wang H., Zhang L., Yin K., Luo H., Li J. (2021) *Landslide identification using machine learning*, Geoscience Frontiers, vol.12, no.1, pp.351-364.